doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2023.03.01

观测证据对小质量 AGB 星 ^{13}C 中子源的约束

张凤华[1]，张　璐[2]，马　坤[1]，崔文元[3]，马文娟[1]，张　波[3]

(1. 沧州师范学院 物理与信息工程学院，沧州 061001； 2. 河北师范大学 数学科学学院，石家庄 050024；
3. 河北师范大学 物理学院，石家庄 050024)

摘要： $^{13}\mathrm{C}(\alpha,\mathrm{n})^{16}\mathrm{O}$ 反应是小质量渐近巨星分支 (asymptotic giant branch, AGB) 星 ($M/M_{\odot} \leqslant 3$，M 和 $M_{\odot}$ 分别表示 AGB 星的质量和太阳质量) 内 s 过程 (慢中子俘获过程) 的主要中子源。在对流热脉冲间隔期间，一个储层 (即所谓的“^{13}C 袋”) 内的 ^{13}C 在辐射条件下 (约 8 keV) 燃烧并释放中子。到目前为止，^{13}C 袋的物理形成过程仍远未被充分理解，因此 ^{13}C 袋的结构也一直无法被完全确定。在后处理核合成计算中，^{13}C 袋通常是利用观测数据通过自由的参数化来约束。从基本原理、主要效果及局限性等方面综述了不同观测证据对 ^{13}C 袋的约束作用，最后展望了 ^{13}C 中子源约束问题未来可能的研究方向。

关　键　词： AGB 星；约束；中子源；s 过程

中图分类号： P144　　　　**文献标识码：** A

1　引　言

慢中子俘获过程 (即 s 过程)，是 1957 年 Burbidge 等人[1]为解释比 Fe 族更重元素 ($A > 60$) 的核合成而提出的一种物理机制。按照 20 世纪 90 年代中期以来被广泛接受的观点[2−4]，太阳系中发现的主要强 s 过程分量 (the main and strong components of the s-process，即比质量数 $A \simeq 90$ 重的核) 是在太阳诞生之前就已经死亡的质量相对较小的 AGB 星 ($1.2M_{\odot} < M \leqslant 4M_{\odot}$) 中形成。这些恒星的结构由三层组成：一个简并的 C-O 核心，一个薄的富 He 中间壳层，以及一个低密度、大部分处于对流的富 H 包层。它们经历了

收稿日期： 2022-08-15；　**修回日期：** 2022-10-17

资助项目： 河北省自然科学基金 (A2019110051，A2021205006)；河北省科技厅科学普及专项 (21556202K)；河北省“三三三人才工程”重点资助；沧州师范学院科研创新团队资助 (cxtdl1902)

通讯作者： 张凤华，zfh1968zfh@163.com

被称为热脉冲 (thermal pulses, TPs) 的周期性 He 壳层闪耀。在相对较长的脉冲间隔期间，宁静的 H 壳层燃烧提供了恒星表面的辐射能量[4]。

根据目前的小质量 ($M \leqslant 3M_{\odot}$) AGB 星 s 过程元素核合成模型[5−10]，在 He 壳层对流不稳定性消退之后，富 H 包层对流区渗透到 He 中间壳层区，这被称为第三次挖掘 (third dredge-up, TDU)，并在到达最深处时在富 He 中间壳层和富 H 包层间形成一个包含少量质子的薄过渡区。在 H 壳层重新燃烧时，这些质子被 3α 反应产生的大量 ^{12}C 通过 ^{12}C(p, γ)^{13}N($\beta^{+}\nu$)^{13}C 捕获生成一个 ^{13}C 储层[5,9]，即所谓的 “^{13}C 袋”。当这个区域收缩并升温到 $(9\sim10)\times10^{7}$ K 时，^{13}C 在长脉冲间隔阶段的辐射条件下通过 ^{13}C(α, n)^{16}O 反应释放中子并引发 s 过程核合成。尽管获得的中子密度低 (即 $N_n < 10^{8}$ cm^{-3})，但是，由于辐射中子的时间尺度足够长 (几万年)，确保了足够高的中子辐照量以合成主要成分的 s 过程核。在 TP 期间，当由 He 闪驱动的对流区最高温度超过 3×10^{8} K 时，就会出现第二个中子源，^{22}Ne(α, n)^{25}Mg 这一反应过程比第一个更快，其中子数密度峰值高，但中子辐照量小，因此只对 s 过程核合成略有贡献，主要影响了 s 过程路径分支点的核素。^{22}Ne 中子源主导了更大质量 AGB 恒星的 s 过程核合成[4]。

虽然 ^{13}C(α, n)^{16}O 反应被认为是小质量 AGB 星 s 过程最有效的中子源，但目前人们对于 H 如何从对流包层混入到富 ^{12}C 区域并形成 ^{13}C 储层的具体过程仍不清楚[5,11,12]。在过去的 20 多年里，已经提出了多种物理机制来解释再现观测所需的 ^{13}C，主要有对流超射[9,11,13−15]、重力波[12]、自转[16,17] 和磁场[18−22]等。其中对流超射已经被反复提出，而磁场机制近年来得到了比较系统深入的阐述。目前，^{13}C 袋的形成问题仍然是开放的。

由于无法确定 ^{13}C 袋的具体结构，因此在 Torino 后处理 AGB 模型 (Torino postprocessing AGB models) 中，^{13}C 袋的 ^{13}C 质量比 (^{13}C 核的浓度)、大小 (^{13}C 袋的质量) 及形状 (^{13}C 核的分布)，通常是利用观测数据通过自由的参数化来约束[6,8,23−25]。对 ^{13}C 袋的观测约束主要有四类，即太阳系中 s 过程元素丰度分布模式、不同金属丰度恒星中 [hs/ls] (ls 代表轻 s 元素，hs 代表重 s 元素，[hs/ls]=[hs/Fe]−[ls/Fe]) 和 [Pb/hs] 的光谱观测、比太阳年轻恒星中观测到的 s 过程增丰以及太阳前 SiC 颗粒 (presolar SiC grains) 中高精度测量的同位素比例。它们从不同角度、在不同程度上对 AGB 星 ^{13}C 袋的结构提供了约束。对 ^{13}C 袋结构特征的深入了解有助于揭示 ^{13}C 袋的形成机制。

需要说明的是，文献中模拟 AGB 星 s 过程核合成的模型主要有三种。第一种是 Torino 后处理 AGB 模型[5−8]。该模型通过后处理获得完整的核反应计算。在这种情况下，主要物理参数是通过利用包含关键同位素和反应的受限核网络计算的恒星模型[26,27]得到的，在此基础上强加一个特设的 ^{13}C 袋[9]。Torino 后处理 AGB 模型是传统意义上的、应用最广泛的 ^{13}C 辐射燃烧的 AGB 星 s 过程核合成模型，拟合恒星元素丰度观测数据进行的后处理核合成计算，一般都采用 Torino AGB 模型[2,3,23,24]。第二种是 FRANEC Repository of Updated Isotopic Tables and Yields (FRUITY) 模型[9,10,14]，该模型把完整的核反应网络 (从 H 到 Bi) 直接耦合到恒星的演化过程中，^{13}C 袋是在 TDU 之后自洽形成的，其质量随中间 He 壳层区的自然收缩而减小。FRUITY 模型根据对 AGB 星红外观测的结果[28,29]，预言了更少的脉冲数。近 10 年来，在讨论对 ^{13}C 袋进行后处理核合成计算的假设时，比较现代的观点是

采用 FRUITY 库更新的 Torino 后处理 AGB 模型[19−22,25]。第三种是 Monash 后处理 AGB 模型[30,31]，其质子穿透是“假定的”，没有调用特定的物理形成机制。该模型假设在每个 TDU 事件向恒星内部达最深处时，来自包层的质子被混合到 He 中间壳层中，形成一个部分混合区 (partial mixing zone, PMZ)。Buntain 等人[32]研究了不同类型的 PMZ 对由此产生的 ^{13}C 袋和随后的核合成的影响，发现改变 PMZ 的混合函数曲线通常与改变 PMZ 的范围产生相同的结果。Monash 后处理 AGB 模型还被用来计算小和中等质量富金属 AGB 星 ($1M_{\odot} \sim 8M_{\odot}$) 的恒星产量[30]，探究陨石 SiC 颗粒 AGB 母星的金属丰度[31]以及 s 过程产生的放射性同位素的星系化学演化等问题[33]。本文主要讨论观测数据对 ^{13}C 袋结构参数的约束问题，主要涉及 Torino AGB 模型或根据 FRUITY 库更新的 Torino 后处理 AGB 模型。

本文结构组织如下：第 2 章综述 4 类观测数据对 ^{13}C 袋的约束作用，包括太阳系 s 过程元素丰度分布模式、不同金属丰度恒星 s 过程元素丰度分布模式、银河系年轻恒星的 s 过程元素丰度观测结果以及太阳前 SiC 颗粒中重元素同位素比例等；第 3 章对本工作做简单的总结与展望。

2 对 ^{13}C 袋的约束

2.1 太阳系 s 过程元素丰度分布模式

s 过程负责产生大约一半比 Fe 重的直到 ^{209}Bi 的核素，其中大约有 30 个只能通过 s 过程形成的 (s-only) 核，如不受分叉影响的核钌 100 (^{100}Ru)、镉 110 (^{110}Cd)、锡 116 (^{116}Sn)、碲 122,123,124 (^{122,123,124}Te)、钐 150 (^{150}Sm) 及镝 160 (^{160}Dy)，以及受分叉影响的核钕 142 (^{142}Nd)、锶 86,87 (^{86,87}Sr)、钆 152,154 (^{152,154}Gd) 和钡 134,136 (^{134,136}Ba)[3,7]等。相对于其他恒星而言，通过分析太阳光谱或陨石物质得到的太阳系元素丰度分布数据最精确和详细，因此在 s 过程理论研究中常被作为观测约束。

Gallino 等人[6](以下简称 G98) 对 Torino 后处理 AGB 模型进行了深入的描述，并进行了大量的核合成计算。G98 认为 ^{13}C 袋是包层边界处质子的扩散产生，因此相当小。G98 定义了一个标准情况的 ^{13}C 袋 (以下简称 ST^{13}C 袋)，图 1 为其示意图 (来自 G98 中的图 1)。图中纵轴 X^i 表示核素的质量比例，上标 i 表示 H、^{13}C 或 ^{14}N；横轴 M 表示从 ^{13}C 壳层底部到顶部区域的壳层质量 (单位为太阳质量 $M_{\odot}$)。根据特征中子辐照量的强度又将 ^{13}C 袋细分为三个不同的区域。参照 Bisterzo 等人[8]的更新，ST ^{13}C 袋的总质量约为 $10^{-3}M_{\odot}$，约占小质量 AGB 星中一个典型对流 TP 质量的 1/20，包含约 $5\times10^{-6}M_{\odot}$ 的 ^{13}C 和 $2\times10^{-7}M_{\odot}$ 的 ^{14}N (在 H 壳层燃烧过程中经 CNO 循环生成)，具有指数形式的 ^{13}C 核质量比分布。按照 Straniero 等人[5] 的理论，根据过去的 (主要是基于对流模型的) 计算，以及允许一个初始为太阳金属丰度的恒星再现太阳系主要 s 过程分量的相关计算可导出上述参数[6,23]。采用 ST ^{13}C 袋，G98 表明，金属丰度为半太阳金属丰度 ($Z = 1/2Z_{\odot}$)、初始质量为 $2M_{\odot}$ 的模型可以很好地再现太阳系主要 s 过程分量，而为了使拟合更接近银河系化学演化机制，Arlandini 等人[7] 进一步将最佳拟合结果校准到半太阳金属丰度的 $1.5M_{\odot}$ 和 $3M_{\odot}$ 的模型核

素产量的算数平均值。后续研究发现，使用分区或常数的 ^{13}C 分布也可得到类似的 s 过程元素丰度分布[34]。

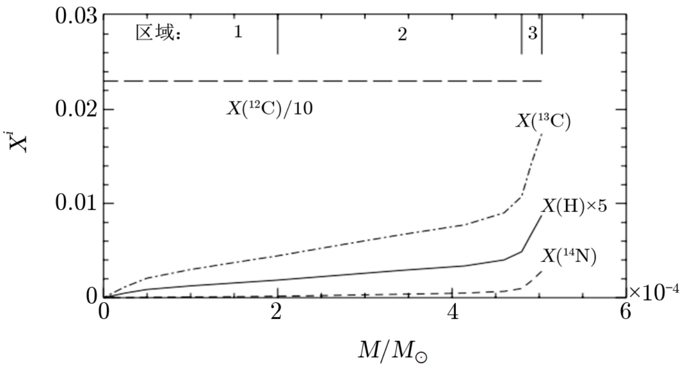

图 1 ST **情况** ^{13}C **袋组成分布**[6]

然而，Palmerini 等人[21]指出，重现太阳系 s-only 核素丰度只是对任何慢中子俘获模型有效性的基本检测，这是个必要条件，不是充分条件；因为控制慢中子俘获过程的参量本质上仅依赖于中子辐照量 (或平均每个 Fe 种子核俘获的中子数目)和中子数密度，而且多数存在的模型能够被调节到解释太阳系丰度[6,7,9,20]。此外，太阳系 s 过程元素丰度分布模式作为 AGB 星 ^{13}C 袋的约束还存在另外一个局限性，即该模式实际上是太阳系形成之前各代 AGB 恒星核合成的总体结果，不能反映单颗 AGB 星的特征。重现太阳系中 s 过程元素丰度分布模式需要耦合星系化学演化 (Galactic Chemical Evolution, GCE) 与 AGB 恒星模型[8,35,37]。Bisterzo 等人[8,37]通过改变 ^{13}C 袋 ^{13}C、^{14}N 丰度以及质量，研究了 ^{13}C 袋内部结构的不确定性对 GCE 分布的影响。他们发现，一旦假定了 ^{13}C 袋强度的不同加权范围，GCE 在太阳系形成时期的预测受 ^{13}C 袋的大小和形状的影响就很轻微。GCE 预测结果也可能受到与 GCE 假设相关的不确定性的影响。但无论如何，该系列研究并未重新约束 ^{13}C 袋。

2.2 不同金属丰度恒星 s 过程元素丰度分布模式

s 过程元素丰度观测的主要目标是：(1) AGB 或后 AGB 星及白矮星周围的行星状星云；(2) 吸积了主 AGB 星产物的双星伴星[3]。恒星表面的元素丰度可利用紫外、光学和红外范围的高分辨率光谱观测得到，其光谱通常来源于恒星表面所谓的光球层中所形成的吸收特征。AGB 恒星是 s 过程正在发生 (或最近发生) 的物体，提供了这些恒星 s 过程核合成的直接信息。然而，AGB 恒星的表面非常冷，光谱中有大量的分子线。因此，从这种光谱中进行丰度分析非常困难，而且可测量元素的数量有限。在后 AGB 星中也发现了过量的重 s 过程元素，它们在从 AGB 恒星演化为行星状星云时迅速失去了残留的包层。但其大气结构与超巨星一样不稳定和复杂，使得光谱分析变得困难。而另一方面，在适当分离的双星系统中，当主恒星演化为 AGB 星时，来自主恒星表面的物质开始聚集到次级伴星上。次级星通常是一颗未演化的主序星或红巨星，它们与普通恒星的区别在于过量的 C 和重 s 过程元素 (如 Ba)。与 AGB 主星相比，它具有更长的恒星演化时间尺度。在主星演化成一颗低光度的白矮星后，只有保存了AGB 主星提供的物质的伴星是可观测到的。在这种情况下，s 过程

的产率 (s-process yields) 很容易在次级伴星的表面测量，因为该物体仍然相对温暖，分子吸收并不严重[3]。另外，稀有气体 (如 Ne, Ar) 的丰度可以从行星状星云的发射线中观测到，即对行星状星云的观测可以为从恒星观测中获得的化学产量提供补充信息[3]。一般来说，对恒星这些谱线的分析只能确定元素的丰度，而且与对太阳系物质的分析相比，可测量的元素种类相对有限。通过对一些特殊谱线的详细分析，也可对一些重要元素如 Ba 和 Eu 进行同位素比例的测量[3,38−41]。

测量 AGB 恒星或受 AGB 核聚变影响的物体中重元素的丰度模式，并与模型预测进行比较，对于理解 s 过程机制非常重要。理论模型预言 AGB 星中的 s 过程元素的形成取决于恒星的初始质量、金属丰度、 ^{13}C 袋的性质和质量损失率。位于幻数中子数 $N=50$, 82 和 126 三个 s 过程峰处元素的丰度可对 AGB 模型提供观测约束。这些峰的出现是因为 Sr、Y、Zr (轻 s 过程元素，ls)、Ba、La、Ce、Nd、Sm (重 s 过程元素，hs) 和 Pb 的低中子俘获截面充当了 s 过程反应路径的瓶颈[3]。AGB 模型的核反应计算结果表明[3,9,34]，[hs/ls] 在高金属丰度 (Z) 的情况下相当低，其原因是每个种子的低中子数限制了重 s 过程元素的产生。当 Z 降低时，[hs/ls] 先变大，在某个 Z (Z 值与 ^{13}C 袋的效率有关) 处达到最大，然后又开始下降。[Pb/hs] 的变化规律与之类似[3]。需要特别强调的是，由于 [hs/ls] 和 [Pb/hs] 的比例在几次挖掘后实际上被冻结了，这些指标几乎与质量损失率和 TDU 的效率无关，而它们是 AGB 建模中最不确定的两个量。因此， [hs/ls] 和 [Pb/hs] 常作为 s 过程效率的指标来检验 AGB 星 s 过程核合成模型，以及推断 AGB 星中子辐照量或 ^{13}C 袋内的 ^{13}C 总量[2,3,9,34]。

基于 G98 ST ^{13}C 袋的 Torino 后处理核合成计算表明，恒星中观测的 [hs/ls] 和 [Pb/hs] 随金属丰度的变化，可以通过采用一系列 ^{13}C 袋强度 (也称 ^{13}C 袋效率) $k\times S_{\rm T}$ (即将 ST ^{13}C 袋 ^{13}C 质量分数乘以一个因子 k，但保持 ^{13}C 袋的质量不变) 很好地重现[8,34,42−45]。例如，Husti 等人[44]采用 $S_{\rm T}/4.5\sim 2S_{\rm T}$ 情况的 ^{13}C 袋模拟了 34 颗 Ba 星 ($-1.19\leqslant$ [Fe/H] $\leqslant -0.04$) 的 s 元素丰度分布模式，而 Bisterzo 等人[43] 采用 $S_{\rm T}/55\sim S_{\rm T}$ 情况的 ^{13}C 袋解释了 94 颗富 s 元素 C 增丰贫金属 (Carbon Enhanced Metal-Poor stars enriched in s-process elements, CEMP(s))星 (其中 89 颗 $-3.5\leqslant$ [Fe/H] $\leqslant -1.7$) 的观测数据 (参见其表 10 和表 11)。Bisterzo 等人[8]指出，$2S_{\rm T}$ 情况对应于上限，因为进一步的质子摄入导致 ^{14}N 的形成，并通过 $^{14}{\rm N(n,p)}^{14}$C (^{14}N 因而被称为中子毒素) 消耗 ^{13}C。显著影响 s 分布的最小 ^{13}C 袋取决于恒星的初始 Fe 含量，因为每个 Fe 种子的可用中子数量随着金属丰度的降低而增加。作为最小的 ^{13}C 袋，假设在盘金属丰度 ([Fe/H]<1)[34] 为情况 $0.1S_{\rm T}$，在晕金属丰度 ([Fe/H]>1)为情况 $0.03S_{\rm T}$[42,43]。这些拟合参数对 AGB 星 ^{13}C 袋内的 ^{13}C 总量范围给出了限制。

通常根据 TP-ACB 星外包层的碳、氧丰度比 C/O，将其分为 2 类：C/O<1 的 MS 星和 S 星以及 C/O≥1 的 C(N) 星[2]。对于给定的金属丰度，观测到银盘上光谱型为 MS、S、C(N) 的恒星和 Ba 星中三个 s 过程峰的弥散[3,34,46]。在低金属丰度下，基于高分辨率光谱的测量，在 CEMP(s) 星中观测到更大的弥散[45,47−50]。造成这种现象的物理原因尚不清楚，可能是由于 ^{13}C 袋参数及 AGB 星初始质量的变化[6]。观测到的弥散仍然可通过对 ^{13}C 袋匹配不同的 ^{13}C 核总量来解释[3,34,43]。

Liu 等人[24]指出，对于固定金属丰度和初始质量的 AGB 模型，最终的 s 过程元素产物

不仅依赖于总的 ^{13}C 质量，而且是 ^{13}C 袋的质量、^{13}C 质量比例以及在较小程度上 ^{13}C 分布的函数。例如，基于较大 ^{13}C 袋的 AGB 模型计算过高预测 [hs/ls] 的天文观测，而事实上 [hs/ls] 预言值很容易通过减少较大 ^{13}C 袋内的 ^{13}C 质量比例来降低。因此，在解释给定金属丰度下观测到的 s 过程元素丰度弥散时，应该考虑 ^{13}C 袋所有参数的影响。然而，s 过程元素丰度的观测数据对 AGB 恒星模型中采用的 ^{13}C 袋的不同参数不够敏感[51]。因为 s 过程实质上改变的是单个核素的丰度，而不是单个元素的丰度[25]。而光谱观测主要提供单个元素的丰度，只有极少数的元素可测量同位素比例。因此对 ^{13}C 袋精细结构的约束难以从恒星光谱观测中获得[23]。

2.3 银河系年轻恒星的 s 过程元素观测约束

近 10 年来，随着观测技术的提高，对 ^{13}C 袋参数新的观测约束逐渐浮现出来。对比太阳与年轻的疏散星团中恒星 s 过程元素丰度的测量结果表明[52−56]：与太阳相比，富中子核的 s 过程元素 Y、Zr、Ba、La 和 Ce 增丰，且较重的 s 元素 (Ba、La 和 Ce) 与较轻的 s 元素 (Y 和 Zr) 增丰的程度相当，因此两组元素丰度之间大致保持太阳的比例。最近，基于超大望远镜 (VLT) 的 UVES 光谱仪进行的 ESO-GAIA 光谱巡天的相关论文，系统地证实了年轻恒星中 s 过程元素丰度的增加[21,57]。

Maiorca 等人[58](以下简称 M12) 对上述观测结果进行了深入分析。M12 指出，根据传统的 s 过程核合成脚本，银河系化学和动力学演化模型预言的太阳形成后富含中子元素的丰度 $[X_i/\mathrm{Fe}]$ 为一个平台，甚至减少，但不会增加。M12 认为，这种观测结果只能在一种情况下才可以理解，即 $^{13}\mathrm{C}(\alpha,\mathrm{n})^{16}\mathrm{O}$ 中子源在小质量恒星中的贡献比到目前在 AGB 模型中采用的要大。M12 表明，仅需要极小质量 ($M < 1.5M_{\odot}$) AGB 星中的 ^{13}C 储层比先前假定的大 3 倍，即 ^{13}C 袋质量为 $4\times10^{-3}M_{\odot}$，在 ^{13}C 袋的这个深度范围内平均有效的 ^{13}C 质量丰度为 $\overline{X_{13}} = (3\sim5)\times10^{-3}$ (G98 ST 情况的 $\overline{X_{13}} = 5\times10^{-3}$)，就可以由银河系演化和核合成模型解释所观测到的增丰现象。M12 的大口袋脚本将有限的脉冲- 脉冲间隔循环与高 s 过程效率结合在一起，不需要引入任何特别的中子俘获过程 (例如由 Travaglio 等人[36] 建议的 “LEPP－Light Element Primary Process”) 来弥补太阳系 $A < 120$ 情况下 s 核素的匮缺，并且它也不会改变之前对太阳附近质量更大 ($1.5M_{\odot}\sim2.5M_{\odot}$) 的 s 过程元素增丰 AGB 星的解释[28,46]。

M12 的大口袋模型满足最近来自恒星光度的观测约束[28,29]。这些工作证明了有效的质量损失阻止了 AGB 亮度大于 $10^4L_{\odot}$ 的值，从而意味着比以前的模型更低的脉冲数[19]。Herwig 等人[11]以及 Cristallo 等人[9]发现，单是对流超射机制不能形成质量大于 $10^{-3}M_{\odot}$ 的 ^{13}C 袋[24]，而考虑了自转的对流混合模型表明，低金属丰度或快速自转富金属的 AGB 星可形成大质量的 ^{13}C 袋，自转速度的不同可能会导致袋内 ^{13}C 质量及分布的改变[17]。

值得特别指出的是，近年来，磁流体动力学 (magnetohydrodynamic, MHD) 诱导的混合 ^{13}C 储层形成机制得到了比较系统的阐述，并对 M12 的大口袋脚本给予了有利的支持[19−22]。首先，Trippella 等人[19]认为，磁浮力 (或其他强迫机制) 是形成类似 M12 建议的那样一个 ^{13}C 储集层的良好候选物。随后，Nucci 和 Busso[18]研究发现，在 AGB 恒星的辐射区，对于完整的 MHD 方程，一个相当普遍、精确的解析解是可能的。接下来，Trippella

等人[20]首次尝试描述一个 MHD 诱导混合的 ^{13}C 储层形成物理机制，实现了 MHD 方程的精确解，计算了在 $1.5M_{\odot}$、太阳金属丰度 AGB 星内第 6 次挖掘产生的 ^{13}C 袋的组成分布。Palmerini 等人[21]重新计算了上述分布，结果如图 2 所示。Palmerini 等人[21]还对金属丰度在 $(\frac{1}{3}\sim 1.0)Z_{\odot}$ 的区间、质量在 $(1.5\sim 3)M_{\odot}$ 范围的模型，计算了其质子对富 He 中间壳层的渗透以及随后的 ^{13}C 中子源的形成。这些研究结果表明，MHD 诱导的 ^{13}C 储层特点是浓度小，在大多数情况下延伸到约 $10^{-3}M_{\odot}$，并几乎有一个平坦的 ^{13}C 核分布形状。对于最小质量模型的第一个脉冲，该区域的深度约为 $5\times 10^{-4}M_{\odot}$，然后随着初始质量和热脉冲数的增加而减小。这证实了 M12 的建议，即至少在质量很小的 AGB 恒星 $(M\leqslant 1.5M_{\odot})$ 中，在 TDU 形成的 ^{13}C 储集层比以前采用的大得多。最近，Busso 等人[22]又对质量分别为 $1.5M_{\odot}$, $2M_{\odot}$ 和 $3M_{\odot}$，金属丰度 $-1.3\leqslant[\mathrm{Fe/H}]\leqslant 0.1$ 的 AGB 星演化模型计算了 MHD 诱导的 ^{13}C 袋的形成，并提供了对 ^{13}C 袋质量的解析拟合方法。所得结果进一步验证了之前的结论。

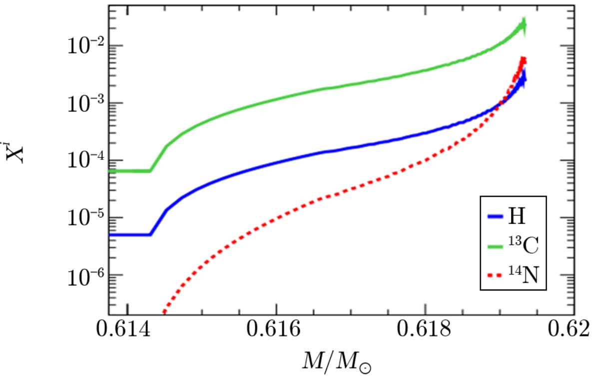

图 2　$1.5M_{\odot}$ **太阳金属丰度的 AGB 恒星的 He 中间壳层，在第 6 次 TDU 中获得的 H 的分布以及随后形成的** ^{13}C **和** ^{14}N **的分布**[21]

2.4　太阳前 SiC 颗粒中重元素同位素比例

表明 ^{13}C 袋与传统上采用的大不相同的独立的观测数据，来自 Liu 等人[23−25,59] 最近对太阳前 SiC 颗粒中 s 元素同位素比例的分析。

考虑到 s 过程发生在 AGB 恒星中一个相对较低的中子密度环境中，s 过程中子流在幻数中子数之间达到稳定状态，其中一个核素的麦克斯韦平均恒星 (n,γ) 截面 (MACS) $\langle\sigma\rangle$ 和相应的 s 过程丰度 N_s 的乘积 $\langle\sigma\rangle\ N_s$ 几乎不变 (参看文献 [3] 的图 2)。因此，除受分支点影响的核外，位于幻数中子数之间的核素丰度 N_s 与它们的 $\langle\sigma\rangle$ 成反比，而对 AGB 恒星模型中采用的 ^{13}C 袋的参数几乎不敏感。另一方面，中子幻数核 ^{88}Sr$(N=50)$, ^{138}Ba$(N=82)$ 和 ^{208}Pb$(N=126)$，由于其中子捕获截面非常小，因此成为 s 过程路径上中子捕获流的瓶颈，并调节 s 过程路径中的中子流。其中，^{88}Sr 和 ^{138}Ba 的 $\langle\sigma\rangle$ 分别是各自归一化 s-only 同位素 ^{86}Sr 和 ^{136}Ba 的1/10[24]，这使得同位素比例 $\delta(^{88}\mathrm{Sr}/^{86}\mathrm{Sr})$ 和 $\delta(^{138}\mathrm{Ba}/^{136}\mathrm{Ba})$ 的 AGB 模型预测对模型计算中采用的 ^{13}C 袋的细节极为敏感，因此可以作为 ^{13}C 袋的示踪剂[23−25]。其中同位素比例的 δ 值定义为样品相对于标准同位素比例的千分比偏差，即

$\delta(^{a}X/^{b}X) = [(^{a}X/^{b}X)_{颗粒}/(^{a}X/^{b}X)_{标准} - 1] \times 1000$[59]。

SiC 是一种难熔矿物相，在富含 C (C/O $>$ 1) 的环境中凝结[60]。SiC 颗粒最初发现于碳质球粒陨石中。大多数的太阳前 SiC 颗粒 (大于 90%) 来自于金属丰度接近 $(1.5 \sim 3)M_{\odot}$ 的小质量 AGB 星，并且包含了具有 s 过程同位素特征的重微量元素[25,61,62]。对 SiC 颗粒重元素同位素组成的分析精度达到约 1%~10%[63,64]。因此，它提供了一个独特的机会，以目前天文观测无法实现的精度来研究 AGB 星的 s 过程元素核合成[25]。

Liu 等人[23]证明，在大多数情况下，只使用 ^{13}C 袋的一个示踪剂，例如 $\delta(^{138}\mathrm{Ba}/^{136}\mathrm{Ba})$，不可能将 ^{13}C 质量比与 ^{13}C 袋质量的影响分开。需要对 SiC 颗粒中 ^{138}Ba/^{136}Ba 和 ^{88}Sr/^{86}Sr 比值进行耦合测量，以监测沿 s 过程路径上两个峰值处的中子流。Liu 等人[24]使用共振电离质谱法 (resonance ionization mass spectrometry, RIMS)，同时测量了来自 Murchison 陨石的 61 颗太阳前 SiC 颗粒中锶和钡同位素比。结果表明，在 Torino 后处理 AGB 模型中只改变恒星的初始质量，不能解释在颗粒中观测到的同位素比范围[24]。通过将相关联的 ^{88}Sr/^{86}Sr—^{138}Ba/^{136}Ba 值，与具有近太阳金属丰度的 Torino 后处理 AGB 模型 (以 $2M_{\odot}$ 和 $0.5Z_{\odot}$的 AGB 模型作为代表) 进行比较，从而得到小质量 AGB 星中 ^{13}C 袋的约束条件。

Liu 等人[24]的研究结果表明，在解释 SiC 晶粒中同位素组成变化方面，^{13}C 袋 3 个基本特征参数的重要性顺序为：^{13}C 核的浓度、^{13}C 袋的质量以及 ^{13}C 核的分布。改变质量小于 $1 \times 10^{-3}M_{\odot}$ 的 ^{13}C 袋的大小不足以覆盖整个观测数据范围，需要更大质量的 ^{13}C 袋。由于 $\delta(^{88}\mathrm{Sr}/^{86}\mathrm{Sr})$ 的 AGB 模型预测值对 ^{13}C 质量比敏感，SiC 晶粒中的 $\delta(^{88}\mathrm{Sr}/^{86}\mathrm{Sr})$ 值很好地将其约束在 $S_{\mathrm{T}}/1.3$以下，明确地排除了具有集中 ^{13}C 核的小 ^{13}C 袋作为主要口袋类型，而倾向于在母 AGB 恒星中存在具有稀释核的大袋。为了拟合 SiC 颗粒中观测到的 ^{138}Ba/^{136}Ba 和 ^{88}Sr/^{86}Sr 特征，形成 SiC 颗粒的 AGB 星通常需要具有质量为 $(1 \sim 2) \times 10^{-3}M_{\odot}$ 的 ^{13}C 袋。此外，储层内的 ^{13}C 核的分布形状与传统上的假设应不同，须相当平坦，且在大部分袋体的浓度较低。这些特征现在已成为任何旨在生成适当 ^{13}C 库的混合模型都必须考虑的一般约束[21]。

另外，在测量的 61 颗颗粒中，有 6 颗表现出 ^{138}Ba 的强亏损，其$\delta(^{138}\mathrm{Ba}/^{136}\mathrm{Ba}) < -400‰$。Liu 等人[24]使用 $S_{\mathrm{T}}/7.5$、质量为 $8 \times 10^{-3}M_{\odot}$ 的 ^{13}C 袋重现了这些颗粒中 Sr-Ba 同位素比。Liu 等人[24]认为，在极少数 SiC 颗粒中观测到的这些极负 $\delta(^{138}\mathrm{Ba}/^{136}\mathrm{Ba})$ 值表明一些 AGB 星可能具有极大的 ^{13}C 袋。

随后 Liu 等人[25]又发现，如果采用 Trippella 等人[20]磁性浮力诱导的 ^{13}C 袋 (以下简称 Trippella 袋)，文献中 SiC 颗粒的镍 (Ni)、Sr 和 Ba 的同位素比的观测值，根据 FRUITY 恒星模型更新的 Torino 后处理核合成计算结果可以给出同样的结论。取 Trippella 等人[20]文中图 2 所示的 ^{13}C 袋的 ^{13}C 质量比为初始值，Liu 等人[25]通过对质量为 $3M_{\odot}$、金属丰度为 $1.5Z_{\odot}$ 的 AGB 模型，改变 ^{13}C 袋的 ^{13}C 质量比 (初始值的 $1/3 \sim 1.5$ 倍) 和 ^{13}C 袋质量 $(1.7 \times 10^{-3} \sim 5.0 \times 10^{-3})M_{\odot}$，将模型预测与颗粒数据进行比较，发现仅在 ^{13}C 质量比为初始情况下，能对 Sr-Ba 和 Ni 同位素数据给出相似的解释。Liu 等人[25]深入研究后发现，与晶粒数据最相似的 ^{13}C 质量分数是所选择的恒星金属丰度的线性函数。总之，Sr-Ba 和 Ni 同位素数据共同表明，大多数 SiC 颗粒的母体 AGB 星中存在较大的 Trippella 袋，因此对

应于 H 在低浓度下进入 He 中间壳层的深度混合。作为参考，初始质量为 $3.3\times10^{-3}M_{\odot}$ 的 Trippella 袋中包含的 ^{13}C 量约为 $6.74\times10^{-6}M_{\odot}$，因此平均的 ^{13}C 质量丰度约为 2×10^{-3} (约为 G98 ST 袋的 1/2)。Palmerini 等人[21]和 Busso 等人[22]进一步证实了 Liu 等人[25]的研究结论。正如 Palmerini 等人[21]明确指出，这种结果源于 MHD 诱导的 ^{13}C 储层具有 Liu 等人[24]作为必要性所提出的一般特点。因此，Liu 等人[23−25]的观测结果有力地支持了 ^{13}C 中子源 MHD 驱动混合形成机制。

3　总结与展望

本文综述了四类 s 过程元素丰度分布观测证据对 AGB 星 ^{13}C 袋的约束作用：(1) 利用太阳系 s 过程元素丰度分布模式的约束，定义了 ST 情况的 ^{13}C 袋；(2) 不同金属丰度恒星的 s 过程元素丰度分布模式对 ^{13}C 袋的 ^{13}C 总量范围给出限制；(3) 最近在比太阳年轻的疏散星团中观测到 s 元素增丰，需要在小质量 AGB 星中的 ^{13}C 储层比传统假定的要大才能解释；(4) 在太阳前 SiC 颗粒中 Sr、Ba 和 Ni 等同位素比例的高精度测量结果，则要求大多数 AGB 星应具有比传统假定的质量更大、浓度更低以及分布更平坦的 ^{13}C 袋。这些观测证据有力地支持了 ^{13}C 袋形成的 MHD 脚本，但也不能排除自转、对流超射等机制。

显然，不断探索新的 ^{13}C 袋约束证据，对已有结论进行检验，并对 AGB 星核合成物理条件给出新的启示，对于目前 AGB 星 s 过程元素核合成的研究仍然具有重要意义。例如，可以通过运行与完整的核合成网络耦合的恒星演化模型 (如 FRUITY 模型)，以及在一个恒星模型内进行一个磁浮力引起的混合的详尽处理，进一步检验基于 Torino 后处理核合成计算结论的有效性[25]。又如，Zr 是最典型的 ls 元素[59,65]，AGB 模型对 $\delta(^{92}\mathrm{Zr}/^{94}\mathrm{Zr})$ 的预测值随着 ^{13}C 袋质量的增加而变大，但与恒星质量与金属丰度的变化无关。而 $\delta(^{96}\mathrm{Zr}/^{94}\mathrm{Zr})$ 对最后一个 TP 的预测随初始恒星质量的增加而增加，其最小值不变，这是因为 AGB 恒星的最终 ^{96}Zr 产物强烈依赖于 $^{22}\mathrm{Ne}(\alpha,\mathrm{n})^{25}\mathrm{Mg}$ 速率。一个即将开展的研究课题就是获取新的 SiC 颗粒高精度 Zr 同位素数据，以便更好地区分恒星质量与口袋质量的影响，这将允许人们对形成主流 SiC 颗粒的 AGB 星的质量施加一个上限[25]。

参考文献：

[1] Burbidge E M, Berbidge G R, Fowler W A, et al. Rev Mod Phys, 1957, 29: 547
[2] Busso M, Gallino R, Wasserburg G J. ARA&A , 1999, 37: 239
[3] Käppeler F, Gallino R, Bisterzo S, et al. RvMP, 2011, 83: 157
[4] Cristallo S, La Cognata M, Massimi C, et al. ApJ, 2018, 859: 105
[5] Straniero O, Gallino R, Busso M, et al. ApJ, 1995, 440: L85
[6] Gallino R, Arlandini C, Busso M, et al. ApJ, 1998, 497: 388
[7] Arlandini C, Käppeler F, Wisshak K, et al. ApJ, 1999, 525, 886
[8] Bisterzo S, Travaglio C, Gallino R, et al. ApJ, 2014, 787: 10

[9] Cristallo S, Straniero O, Gallino R, et al. ApJ, 2009, 696: 797
[10] Cristallo S, Piersanti L, Straniero O, et al. ApJS, 2011, 197: 17
[11] Herwig F, Bloecker T, Schoenberner D, et al. A&A, 1997, 324: L81
[12] Denissenkov P A, Tout C A. MNRAS, 2003, 340: 722
[13] Freytag B, Ludwig H-G, Steffen M. A&A, 1996, 313: 497
[14] Straniero O, Gallino R, Cristallo S. NuPhA, 2006, 777: 311
[15] Battino U, Pignatari M, Ritter C, et al. ApJ, 2016, 827: 30
[16] Herwig F, Langer N, Lugaro M. ApJ, 2003, 593: 1056
[17] Piersanti L, Cristallo S, Straniero O. ApJ, 2013: 774: 98
[18] Nucci M C, Busso M. ApJ, 2014, 787: 141
[19] Trippella O, Busso M, Maiorca E, et al. ApJ, 2014, 787: 41
[20] Trippella O, Busso M, Palmerini S, et al. ApJ, 2016, 818: 125
[21] Palmerini S, Trippella O, Busso M, et al. GeoCoA, 2018, 221: 21
[22] Busso M, Vescovi D, Palmerini S, et al. ApJ, 2021, 908: 55
[23] Liu N, Savina M R, Davis A M, et al. ApJ, 2014, 786: 66
[24] Liu N, Savina M R, Gallino R, et al. ApJ, 2015, 803: 12
[25] Liu N, Gallino R, Cristallo S, et al. ApJ, 2018, 865: 112
[26] Straniero O, Chieffi A, Limongi M, et al. ApJ, 1997, 478:332
[27] Straniero O, Domınguez I, Cristallo S, et al. PASA, 2003, 20: 389
[28] Guandalini R, Busso M. A&A, 2008, 488: 675
[29] Guandalini R, Cristallo S. A&A, 2013, 555: A120
[30] Karakas A I, Lugaro M. ApJ, 2016, 825: 26.
[31] Lugaro M, Karakas A I, Pető M, et al. GeCoA, 2018, 221: 6
[32] Buntain J F, Doherty C L, Lugaro M, et al. MNRAS, 2017, 471：824
[33] Trueman T C L, Côté B, Yagüe L A, et al. ApJ, 2022,924:10
[34] Busso M, Gallino R, Lambert D L, et al. ApJ, 2001, 557: 802
[35] Travaglio C, Galli D, Gallino R, et al. ApJ, 1999, 521: 691
[36] Travaglio C, Gallino R, Arnone E, et al. ApJ, 2004, 601: 864
[37] Bisterzo S, Travaglio C, Wiescher M, et al. ApJ, 2017, 835: 97
[38] Magain P, Zhao G. A&A, 1993, 268: L27
[39] Mashonkina L, Zhao G. A&A, 2006, 456: 313
[40] Aoki W, Honda S, Beers T, et al. ApJ, 2003, 586: 506
[41] Cui W Y, Jiang X H, Shi J R, et al. ApJ, 2018, 854: 1311
[42] Bisterzo S, Gallino R, Straniero O, et al. MNRAS, 2010, 404: 1529
[43] Bisterzo S, Gallino R, Straniero O, et al. MNRAS, 2011, 418: 284
[44] Husti L, Gallino R, Bisterzo S, et al. PASA, 2009, 26: 176
[45] Sneden C, Cowan J J, Gallino R. ARA&A, 2008, 46: 241
[46] Abia C, Domínguez I, Gallino R, et al. ApJ, 2002, 579: 817
[47] Aoki W, Bisterzo S, Gallino R, et al. ApJ, 2006, 650: L127
[48] Ivans I , Sneden C, Gallino R, et al. ApJ, 2005, 627: L145
[49] Roederer I, Frebel M, Shetrone C, et al. ApJ, 2008, 679: 1549
[50] Thompson I, Ivans I, Bisterzo S, et.al, ApJ, 2008, 667: 556
[51] Buntain J F, Doherty C L, Lugaro M, et al. MNRAS, 2017, 471: 824
[52] D’Orazi V, Magrini L, Randich S, et al. ApJL, 2009, 693: L31
[53] Jacobson H R, Pilachowski C A, Friel E D. ApJ, 2011, 142: 59
[54] Jacobson H R, Friel E D. ApJ, 2013, 145: 107
[55] Maiorca E, Randich S, Busso M, et al. ApJ, 2011, 736: 120
[56] Yong D, Carney B W, Friel D F. ApJ, 2012, 144: 95
[57] Tang B, Geisler D, Friel E, et al. A&A, 2017, 601: A56

[58] Maiorca E, Magrini L Busso M, et al. ApJ, 2012, 747: 53
[59] Liu N, Gallino R, Bisterzo S, et al. ApJ, 2014, 788: 163
[60] Lodders K, Fegley B. Metic, 1995, 30: 661
[61] Barzyk J G, Savina M R, Davis A M, et al. M&PS, 2007, 42: 1103
[62] Lugaro M, Davis A M, Gallino R, et al. ApJ, 2003, 593: 486
[63] Savina M R, Pellin M J, Tripa C E, et al. GeCoA, 2003, 67: 3215
[64] Stephan T, Trappitsch R, Davis A M, et al. IJMSp, 2016, 407: 1
[65] Lugaro M, Tagliente G, Karakas A I, et al. ApJ, 2014, 780: 95

Constraints of Observational Evidences on the ^{13}C Neutron Source in Low-mass AGB Stars

ZHANG Feng-hua[1], ZHANG Lu[2], MA Kun[1], CUI Wen-yuan[3],
MA Wen-juan[1], ZHANG Bo[3]

(1. Department of Physics and Information Engineering, Cangzhou Normal College, Cangzhou 061001, China; 2. College of Mathematics Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China; 3. College of Physics, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China)

Abstract: The $^{13}\mathrm{C}(\alpha,\mathrm{n})^{16}\mathrm{O}$ reaction is the major neutron source for the s-process (slow neutron captures) in Low-mass AGB Stars ($M/M_{\odot} \leqslant 3$，M and $M_{\odot}$ represent the mass of AGB stars and the mass of the sun respectively). It is activated within a ^{13}C reservoir (so called ^{13}C pocket), in radiative conditions (at about 8 keV) in the interpulse phase. To date, the physical processes leading to the formation of the ^{13}C pocket are still far from being fully understood, and so the structure of the pocket has never been completely determined. In the postprocessing model calculations, the pocket is usually constrained by free parameterization using the observed data. The solar system s-process abundance pattern and the spectroscopic observations of stars with different metallicities could limit the range of total amount of ^{13}C nuclei within the ^{13}C pocket. And the s-process enhancements observed recently in young stellar populations, as well as the high-precision measurement of isotopic ratios in presolar SiC grains, require that most AGB stars should have ^{13}C pockets with greater mass, lower concentration and flatter distribution profile than traditionally assumed. These characteristic conditions should help to finally reveal the physical mechanism for the ^{13}C-pocket formation.

In this paper, the constraints of different observational evidences on ^{13}C pockets are reviewed from the aspects of basic principles, main effects and limitations. In the end, few possible directions for future studies of constraints on ^{13}C neutron source are prospected.

Key words: AGB star; constraints; neutron source; s-process